

Beschreibung des Systemverhaltens bei der Montage von Schraubenverbindungen in Abhängigkeit geometrischer und tribologischer Größen

Abgeschlossenes Projekt

Förderinstitution: IGF/AIF-Vorhaben

Projektnummer: 19160 N

Projektbearbeiter: Dr. Kay Langschwager

Projektlaufzeit: 01.07.2017 – 31.07.2020

1. Thema

Die Schraubenverbindung gilt als das am weitesten verbreitete lösbare Verbindungselement. Für eine betriebssichere Funktion einer Baugruppe ist die richtige Montage einer Schraubenverbindung von großer Wichtigkeit. Das Montageverhalten wird neben der Geometrie wesentlich von den tribologischen Kontakten zwischen Kopf- / Mutternaufgabe und Gegenlage, im Gewindeeingriff und in der Trennfuge bestimmt. Das tribologische System ergibt sich durch Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenmedium (Beschichtung, Schmierung) und Beanspruchungskollektiv. Zu dem Beanspruchungskollektiv zählen die Belastung, die Bewegung und die Temperatur. Im Rahmen der standardisierten Anziehprüfung nach DIN EN ISO 16047, der Untersuchung des Montageverhaltens unter definierten Versuchsbedingungen, können die jeweiligen einzelnen Teilreibungszahlen eines tribologischen Systems unter Raumtemperatur ermittelt werden. Die Reibungszahlen sind beeinflusst durch die komplexe Wechselwirkung verschiedener Einflussgrößen, die in diesem Forschungsvorhaben systematisch untersucht werden.

Das Forschungsthema lautet: „Beschreibung des Systemverhaltens bei der Montage von Schraubenverbindungen in Abhängigkeit geometrischer und tribologischer Größen“. Das Thema untergliedert bereits die zu untersuchenden Einflussgrößen in geometrische und tribologische Größen. Die hier untersuchten geometrischen Größen umfassen im Wesentlichen:

- die Schraubenabmessung: M8, M10, M16,
- die Klemmlänge und
- die Flächenpressung / Reibkontaktfläche abhängig von der aufgebrachten Vorspannkraft und der lokalen Geometrie der Schraube (Schirmungswinkel).

Zu den variierten wesentlichen tribologischen Größen gehören:

- die Beschichtung
 - Basisbeschichtung: unbeschichtet, phosphatiert, Zink-Nickel, Zink-Lamelle und
 - Top-Coat / Versiegelung: GC TOP 120 HLX, Gleitmo 605, GC 01 RW,
- der Schmierstoff,
- die Gegenlage: Gegenlage hoher Härte (HH), Gegenlage niedriger Härte (HL),
- die Montage: Montagerichtung, Vorspannkraft- / Drehwinkelgeregelt, Drehgeschwindigkeit / Reibgeschwindigkeit
- der Verschleiß durch Mehrfachanzug und
- die Temperatur.

Die standardisierte Anziehprüfung ermöglicht keine Trennung der tribologischen und geometrischen Einflussgrößen. Daher soll ein weiteres Prüfverfahren zur Ermittlung lokaler Reibungszahlen angewendet werden, um die Ergebnisse aus dem Anziehprüfstand zu verifizieren. An einem Schwing-Reib-Verschleiß-Prüfstand (SRV®-Prüfstand – tribologisches Ersatzmodell) werden die tribologischen Einflussgrößen gesondert untersucht. Die Erkenntnisse aus dem tribologischen Ersatzmodell werden mit Erkenntnissen der standardisierten Anziehprüfung zur Ermittlung der Reibungszahlen / Teilreibungszahlen und damit der allgemeinen Bewertung des Montageverhaltens von Schraubenverbindungen verglichen.

Im Anziehprüfstand befindet sich ein Mehrkomponentensensor zur kombinierten Messung der Vorspannkraft und mindestens eines Teilmoments (Kopf- und / oder Gewindemoment). Nach dem aktuellen Stand der Technik werden die Messsignale getrennt und statisch kalibriert. Für die Kalibrierung der Vorspannkraft findet DIN EN ISO 376:2011-09 und für das / die Teilmoment/e DIN 51309:2005-12 Anwendung. Eine kombinierte, dynamische Kalibrierung existiert für die Mehrkomponentensensoren aktuell nicht. Weiterhin gibt es keine Rückführung der Mehrkomponentensensoren auf das nationale Normal. So wird ein mögliches Übersprechen der Messsignale nicht erfasst. In der Vergangenheit hat der Deutsche Schraubenverband e.V. groß angelegte, internationale Ringversuche durchgeführt, um an der Grundgesamtheit der Ergebnisse die unterschiedlichen Anziehprüfstände zu bewerten und in Kategorien einteilen zu können.

2. Problemstellung

Folgende Fragestellungen werden adressiert, um übergeordnete Fragestellungen des komplexen Systemverhaltens bei der Montage von Schraubenverbindungen zu beantworten:

Wie valide ist die Ermittlung der Reibungszahlen im Anziehprüfstand?

Dazu werden die Rohsignale des Mehrkomponentensensors an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) kombiniert betrachtet und bezüglich eines Übersprechverhaltens analysiert. Ein gegebenenfalls detektiertes Übersprechverhalten soll mittels mathematischer Hilfsmittel korrigiert werden. Die so aus Rohsignalen errechneten Werte, werden mit den direkten Output-Werten des Anziehprüfstands des Instituts für Werkstoffkunde (TU Darmstadt) verglichen.

Lassen sich Maßnahmen für eine verbesserte Anziehprüfung definieren, um damit eine höhere Vergleichbarkeit der Reibungszahlen unterschiedlicher Anziehprüfstände zu gewährleisten?

Dazu werden einzelne Einflussgrößen auf die Teilreibungszahlen separat betrachtet und Maßnahmen abgeleitet, um anwenderbezogene Abweichungen der Teilreibungszahlen zu verringern und damit auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

Stimmen die Reibungszahlen am Anziehprüfstand mit den Reibungszahlen im tribologischen Ersatzmodell überein? Welche Bedingungen müssen hierfür gelten, wo bestehen die Unterschiede?

Hierzu findet ein Vergleich zwischen den Reibungszahlen innerhalb der Anziehprüfung und dem SRV®-Prüfstand statt.

Welchen Einfluss zeigen unterschiedliche funktionale Schichtsysteme (Basisbeschichtung und Top-Coat / Versiegelung) auf die ermittelten Kennwerte?

Hierzu werden die tribologischen Einflussgrößen sowohl am Anziehprüfstand als auch am tribologischen Ersatzsystem untersucht und bewertet.

Lässt sich eine Referenz-Schraubenverbindung aus dem untersuchten Parameterraum identifizieren, mit der eine gute Vergleichbarkeit der Prüfstände gewährleistet wird?

Dazu werden alle Ergebnisse abschließend gemeinschaftlich betrachtet und bewertet

3. Ziele

Das übergeordnete Ziel ist das verbesserte Verständnis und die Beschreibung des Montageverhaltens sowie die Qualität Ergebnisse aus Anziehprüfungen zu steigern. Dadurch lässt sich auch die Sicherheit der Schraubenverbindung im Betrieb erhöhen. Die Projektziele lassen sich in messtechnische und tribologische Teilziele untergliedern.

Die messtechnischen Ziele umfassen im Wesentlichen:

- die detaillierte Bewertung des sensorbedingten Übersprechverhaltens des Anziehprüfstandes der Fa. Schatz (Bezeichnung: Horizontal mechanische Vorrichtung zur Prüfung von Schrauben und Muttern bis 600 Nm und 200 kN Vorspannkraft),
- Anschluss an das nationale Normal für eine verbesserte Vergleichbarkeit der Ergebnisse,
- eine eingehende Auseinandersetzung mit der konstruktiven Auslegung der Anziehprüfstände, um gegebenenfalls Empfehlung für Erweiterungen ableiten zu können und
- eine Auseinandersetzung mit der den allgemeinen Berechnungsvorschriften zur Ableitung der Teilreibungszahlen beim Anzieh- und Losdrehprozess.

Die tribologischen Ziele lassen sich zusammenfassen in:

- eine Gegenüberstellung der Reibungszahlen, ermittelt am Anziehprüfstand und am tribologischen Ersatzmodell und
- die systematische Untersuchung tribologischer Einflussgrößen (zum Beispiel funktionelle Oberflächen, Umgebungsbedingungen und Flächenpressung) auf die Ausprägung der Reibungszahlen.

Abschließend sollen Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung von Richtlinien und Normen gegeben werden, um die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Ermittlung der Teilreibungszahlen innerhalb einer Schraubenverbindung zu erhöhen.

4. Vorgehensweise

Die Problemstellung, die Unterteilung der Einflussgrößen in geometrische und tribologische Größen sowie die Durchführung der Untersuchungen an unterschiedlichen Prüfständen – Anziehprüfstand, Mehrkomponentenkalibriereinrichtung und tribologisches Ersatzmodell (Schwing-Reib-Verschleiß-Prüfstand) – erfordern eine mehrstufige Vorgehensweise, um die komplexe Aufgabenstellung zielführend zu untergliedern:

- Stufe 1 umfasst im Wesentlichen die Anziehprüfung nach DIN EN ISO 16067, die gängige Prüfung zur Ermittlung der Gesamtreibungszahl und der Teilreibungszahlen an Schraubenverbindungen unterschiedlicher Abmessungen und Beschichtungen.
- Stufe 2 beinhaltet das tribologische Ersatzsystem. Zusammen mit den Erkenntnissen aus Stufe 1 erfolgt daraus die Ableitung einer Modellvorstellung des tribologischen Verhaltens.

- Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Rückführung der Messsignale des Mehrkomponentensensors in einer Mehrkomponentenkalibriereinrichtung durch die PTB und der Abgleich zwischen dem von der PTB ermittelten Umrechnungs-Polynom und der von der Prüfstands-Software des Anziehprüfstands angezeigten Messgrößen (Bewertung der Validität).
- In Stufe 3 werden an weiteren Prüfständen die gewonnenen Erkenntnisse überprüft, um weiterführende Empfehlungen für Normen und Richtlinien aussprechen zu können.

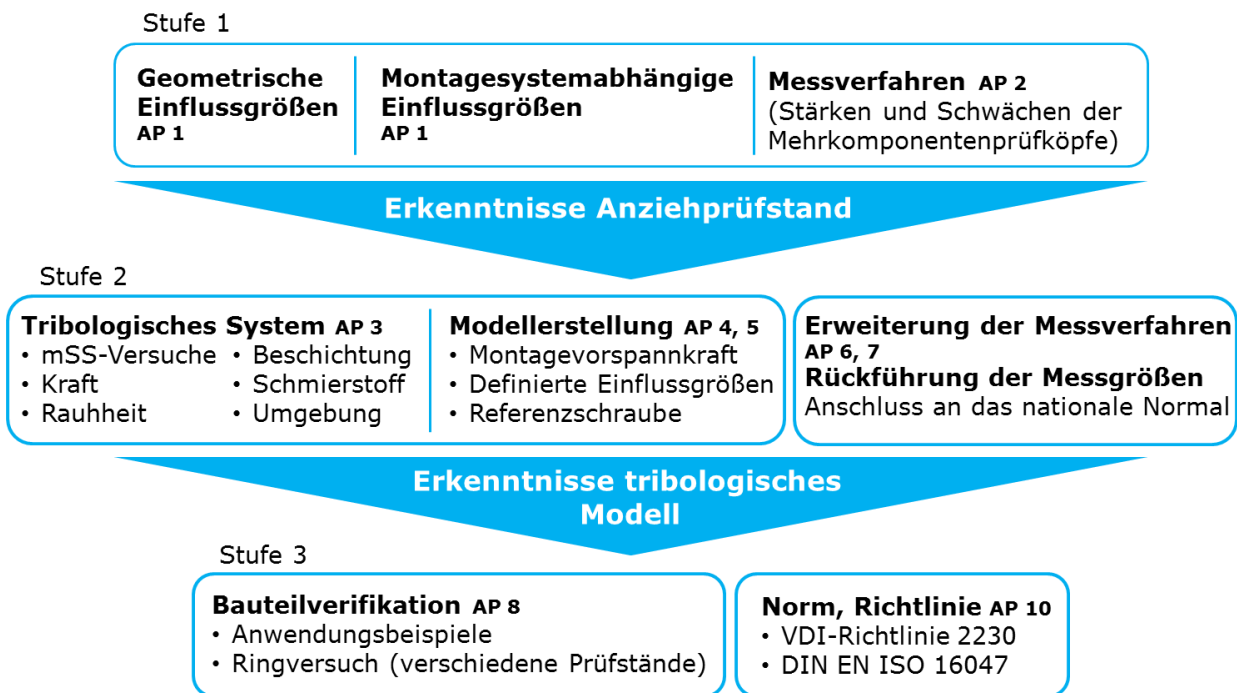


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

5. Ergebnisse

Das Hauptziel des Vorhabens ist die verlässliche Beschreibung des Montageverhaltens, um die Vergleichbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von Anziehprüfungen zu gewährleisten. Dazu ist die korrekte Beschreibung der Teilreibungszahlen unter vorgegebenen Bedingungen maßgeblich.

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig wurde der Mehrkomponentensensor des Anziehprüfstands des Instituts für Werkstoffkunde (TU Darmstadt) auf einer modifizierten Messeinrichtung hinsichtlich des Übersprechverhaltens untersucht (Abschnitt 8.1.1 im Abschlussbericht). Hierzu wurde der Sensor statisch kombiniert mit einer Kraft und einem Moment belastet. Die Rückführung der Rohsignale auf die Kraft und das Moment erfolgte über ein Umrechnungs-Polynom. In Abhängigkeit der vier untersuchten Quadranten wurden unterschiedliche Faktoren für das Umrechnungs-Polynom ermittelt. Für die Betrachtung des Anziehvorgangs ist Quadrant 1 (Vorspannkraft steigt und Moment belastend) und für den Losdrehvorgang Quadrant 4 (Vorspannkraft fällt und Moment entlastend) relevant (Abschnitt 8.1.1 und 8.1.2 im Abschlussbericht). Die Gegenüberstellung der Ergebnisse vom Umrechnungs-Polynom und vom Anziehprüfstand bei den untersuchten Schraubenverbindungen M10 und M16 zeigen eine gute Übereinstimmung (Abschnitt 8.1.3 im Abschlussbericht). Die Versuche erfolgten über eine Drehwinkelsteuerung, bei der zum einen die Rohsignale des Mehrkomponentensensors mit dem 1. Quadranten des Umrechnungs-Polynoms berechnet wurden und zum anderen die interne Software des Anziehprüfstands (Black-Box) verwendet wurde. Die modifizierte Messeinrichtung an der PTB kann die Kräfte und Momente nur in festgelegten Stufen aufbringen. Die Kraft kann in 20 kN-Schritten bis auf maximal 1 MN, das Moment in 20 Nm-Schritten bis auf maximal 2 MNm gesteigert

werden. Diese festen Laststufen führen dazu, dass der Bereich unterhalb von 20 kN und 20 Nm unzureichend abgedeckt ist. Für eine Rückführung der Rohsignale der M8 Schraubenverbindungen ist das Umrechnungs-Polynom deshalb nicht hinreichend präzise.

Am Anziehprüfstand des Instituts für Werkstoffkunde wurden verschiedene Parameter wie Schraubenabmessung, Beschichtung, Top-Coat / Versiegelung, Gegenlage, Klemmlänge, Montageanordnung (Anzug über Schraubenkopf oder Mutter) und die Temperatur in vorspannkraftgesteuerten Anziehversuchen mit Wiederholmontage betrachtet und vergleichend gegenübergestellt (Abschnitt 8.2 im Abschlussbericht). Die Ergebnisse zum Losdrehvorgang haben vergleichbare Ergebnisse, wie das Forschungsvorhaben IGF 16807N geliefert.

Eine Gegenüberstellung der Reibungszahlen am Anziehprüfstand mit Reibungszahlen an tribologischen Ersatzmodellen erfolgt in Abschnitt 8.3 im Abschlussbericht. Es werden zwei Versuchstypen angewendet. Bei Variante eins wird die Normalkraft statisch aufgebracht und bei Variante zwei die Normalkraft kontinuierlich gesteigert. Diese zwei Versuchstypen ergeben in Abhängigkeit der Beschichtung beim Stift-Scheibe-Modell mit geringer Stifthärte (300 HV10) eine relativ gute Übereinstimmung mit Reibungszahlen in der Kopfauflage vom Anziehprüfstand. Zu größeren Abweichungen kommt es beim Stift-Scheibe-Modell mit hoher Stifthärte (740 HV10) zwischen den beiden Versuchstypen und den Reibungszahlen in der Kopfauflage am Anziehprüfstand. Beim Stift-Scheibe-Modell kommt es zwar zu einer größeren Abstraktion des Schraubenkopf-Gegenlage-Kontakts als beim Scheibe-Scheibe-Modell, jedoch ist es möglich, bei maximalen Kräften von 2000 N und entsprechender Stiftgeometrie zu den Anziehversuchen ähnliche Flächenpressungen zu realisieren. Beim Scheibe-Scheibe-Modell kann zwar der original Schraube-Gegenlage-Kontakt nachgestellt werden, jedoch sind die erreichbaren Flächenpressungen zu gering, um einen Vergleich mit Ergebnissen aus dem Anziehprüfstand durchzuführen.

Ein abschließender Vergleich erfolgt anhand eines „kleinen Ringversuchs“ an drei verschiedenen Prüfständen. Hierbei wird betrachtet, inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei einheitlicher Auswertestrategie auswirken (Abschnitt 8.4 im Abschlussbericht). Dazu wurde als Referenzschraubensystem die M8 Schraubenverbindung mit zwei verschiedenen Beschichtungsvarianten ausgewählt, um einerseits eine Variante mit geringen und andererseits mit hohen Streuungen abzubilden.

6. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19160 N der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Schlussberichtes kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie